

放射性废物处理 处置的研究开发

〔日〕天沼 惊 阪田贞弘 主编

中国科学院图书馆

放射性废物处理处置的 研究开发

〔日〕天沼 惊 阪田贞弘 主编

《放射性废物处理处置的研究开发》翻译小组 译

中国环境科学出版社

1988

内 容 简 介

本书主要介绍各种核能设施的现场处置条件来考虑放射性废物的管理方法。内容包括：中、低、高放废物的处理和处置；地下处置与日本的地层状况；各国的法规和标准化的动向。此外还介绍了各国如何在反映自然环境与社会环境要求的基础上进行放射性废物的管理，具有相当的参考价值。

读者对象：可供从事核工业及环境保护的科研、教学、生产、管理人员和有关领导干部参考。

天沼 惊 阪田贞弘 主编

放射性廃棄物処理処分に關する研究開発

株式会社産業技術出版

1983年(东京)

放射性废物处理处置的研究开发

〔日〕天沼 惊 阪田贞弘 主编

《放射性废物处理处置的研究开发》翻译小组 译

责任编辑 刘仁平 李玲英

中国环境科学出版社出版

北京崇文区东兴隆街69号

天津市大邱庄印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

1988年12月第 一 版 开本 787×1092 1/16

1988年12月第一次印刷 印张 34 插页 2

印数 1—1 350 字数 792千字

ISBN 7-80010-106-1/X·108

定价：11.40元

译者的话

1983年初，日本给中国环境科学研究院寄来了内部发行了300本的带有专利性质的《放射性废物处理处置的研究开发》一书的征订单，经国家环境保护局解振华同志、中国环境科学研究院韩国刚、邹杰同志联系购得本书。我国有关领导、专家、教授看到本书后，一致认为该书很适合我国环保、教育、科研、行政等部门工作的需要，应立即组织翻译出版。这一建议得到了国家环保局解振华同志的大力支持，于1983年11月成立了国家环境保护局、中国环境科学研究院、核工业部第二设计院等单位组成的翻译小组，由解振华负责全面组织协调，韩国刚、左民同志组织翻译，柯友之同志总校。

本书作者日本核废物处理专家阪田贞弘先生得知我们正在翻译此书的消息后很高兴，为祝贺本书在中国翻译出版特写了“致中国读者”，为此我们向阪田贞弘先生表示衷心的感谢。

本书翻译出版过程中，我们得到了邹杰、刘仁平、刘永良等同志的大力支持和指导，在此表示感谢。

本书第一章译者为韩国刚、姜凤兰、周文敏、石磊、陈晓芒、张玉杰等同志；第二、三、四章译者为左民、荃菁、阎鸿邦、郝海、李鲁阳等同志。由于我们水平有限书中难免会有错误和不当之处，敬请读者批评指正。

译者

1986年6月

《放射性废物处理处置的研究开发》

翻译小组成员

组 长：解振华

副组长：罗国桢 左 民 韩国刚

译 者：韩国刚 左 民 姜凤兰 荃 菁 郝 海 周文敏
阎鸿邦 石 磊 李鲁阳 陈晓芒 张玉杰

校 者：柯友之

致中国读者

这本书，承蒙北京核工程研究设计院柯友之先生任总校，并通过左民等各位中国先生的努力，“放射性废物处理处置的研究开发”中文版出版了，我作为原书主编之一，感到特别高兴。

从1956年以来，我一直从事核能事业的研究和开发，其间有一半以上的时间是从事与放射性废物管理有关的工作，其余的时间则是参加辐照核燃料试验设施与材料试验堆的规划、设计与建设。通过这些经历，我认为放射性废物的管理乃是核能事业与环境的接合点，自然环境自不待言，社会环境也必须予以充分考虑。换言之，人们必须根据自己的国情和各种核能设施的现场条件来考虑放射性废物的管理方法。对于外国的作法，不能仅仅以他们的成功为理由而不加批判地引进。建议根据本国条件和设施的业务对象来加以判断。

但是，认识与把握自己的环境条件并非易事，一般来说，首先要摸清各国是如何进行废物管理的，并分析他们如何反映自然环境与社会环境的要求，这样就能明确地理解自己的环境条件。在处理实际问题的时候，也必须经过这样的过程。我希望读者能以这样的观点来阅读本书。

中国的核能事业已经有了相当长的历史，并且取得了辉煌的成就。当前，正值大力推进核电事业之际，本书若能对读者的工作，对中国核电事业的成功略有裨益，将使我们喜出望外。

这就是我的一点想法。最后衷心祝愿诸位读者在学术上精益求精，在工作上奋勇前进。

阪田贞弘

1985年

编者的话

日本原子能发电设备的容量在1982年10月超过1700万kW,约占全部发电量的12.5%,相当于1981年的电力供给量的17%,它作为今后代替石油的能源而日益重要。

在原子能发电及其支持核燃料循环的全系统中,从循环各环节中排出的放射性废物的处置问题,不仅是日本,也是全世界目前最为关心的。且不用说原子能发电的全部系统,就是同位素在医、理、工学中的利用,其放射性废物排出量也在逐年增加。原来的放射性物质在自然界中大多是作为天然放射性物质存在的,除来自这些放射性物质中的射线外,还有降到地面上的宇宙线。生物在其发生及进化过程中一直受这些放射线的影响。另外,放射性物质还由其具有特定的半衰期的核素确定,即有每隔一定的时间其量减半的特征。由这些事实加上到现在为止的成果,随着今后科学的进步和技术的开发,放射性废物的处置会有完善的措施,在不久的将来就能充分确保放射性的安全性。

日本是世界上利用原子能有数的几个国家之一,由各种活动产生的放射性废物的处置,到目前为止,与之相适应的研究开发,还难说是充分的。而且,几年前后处理厂才开始运行,实际上高水平放射性废液正在产生,加之以核电站为主预定建设大规模工厂,其低放废物的固化体正在大量蓄积,海洋投放也不能按预定实施。另外,预计在以后十年左右,委托海外后处理的废物返回来,所以放射性废物的处置日益受到重视,研究和技术开发也大为盛行。

这时,公司产业技术出版社和技术、计划部门与我们磋商,共同编写本书。这样重要而广泛的问题巨细无遗,非编者所能胜任,然则确保合时宜的计划,若稍能引起多方面的关心实为幸甚。为此编写了有关放射性废物的处理与处置的技术开发现状;与地下处置有关的日本地层的现在见识。笔者聘任各方面从事这方面实际工作的专家分头执笔完成本书。

因此,从现场,或从计划的角度看,把常年在对付积蓄的低放废物的各位专家的实际经验和取得的成绩,叙述是相当具体的。有关高放废物的排放还是从5~6年前开始的,日本的后处理还未用真实的废液作试验。废物处理,特别是处置,除一部分外,只能介绍国外状况和引用文献。另外,从地质处置的观点观察日本地质的情况,希望对今后的开发有参考价值。

因本书由多位作者分别执笔,虽努力使术语及其用法一致,但尚有不足之处;在内容上由于作者的着眼点及文章结构的关系,叙述难免重复敬请原谅。

了解以上情况读本书的各位读者在日本今后的放射性废物处理、处置的研究开发及公众认可方面得有裨益而感到欣慰。

天沼 倅
阪田贞弘

1982年12月

目 录

绪言	(1)
核燃料的循环和放射性废物	(1)
放射性废物的种类和分类	(1)
本书中“处理”、“贮存”和“处置”等词的意义	(2)
处置的基本方法	(4)
铀的冶炼废渣和极低水平的放射性废物	(6)
如何实现放射性废物处置	(7)
第一章 中、低放废物的处理和处置	(8)
一 概论	(8)
(一) 放射性废物	(8)
(二) 中、低放废物	(8)
(三) 放射性废物的主要发生源	(10)
(四) 放射性废物的处理和处置	(10)
二 气体废物的处理和处置	(11)
(一) 发电反应堆	(11)
(二) 后处理设施	(24)
三 液体废物与固体废物的处理	(38)
(一) 减容、稳定化的方法	(38)
(二) 各种固化方法及其特点	(41)
(三) 超铀 (TRU) 废物的处理	(99)
(四) 固化体、固体废物贮存及设施安全评价的设想	(114)
(五) 核设施的中、低放废物处理情况	(127)
(六) 海洋处置	(182)
(七) 陆地处置	(201)
第二章 高放废物的处理与处置	(235)
一 总论	(235)
(一) 高放废物	(235)
(二) 高放废液的固化和固化体的贮存	(236)
(三) 高放废物处置及其方法	(237)
(四) 高放废物的地下处置	(239)
(五) 日本高放废物处理和处置的研究开发	(246)
(六) 有关地下处置的最新课题	(247)
(七) 地下处置安全性的旁证现象及其考察	(250)
二 高放废物的处理	(253)
(一) 高放废物的固化	(253)
(二) 包壳等的处理	(285)

(三) 固化体的完整性.....	(290)
(四) 群分离.....	(316)
三 固化体的贮存与运输.....	(330)
(一) 贮存设施概况.....	(330)
(二) AVM的固化体贮存设施.....	(332)
(三) 运输容器作为固化体贮存设施.....	(335)
(四) 其它的固化体贮存设施.....	(336)
(五) 固化体的运输容器.....	(339)
(六) 固化体的运输.....	(342)
四 高放玻璃固化体的管理系统.....	(343)
(一) 前言.....	(343)
(二) 高放废物.....	(343)
(三) 运输与管理.....	(347)
(四) 管理系统.....	(347)
(五) 国外的管理设施计划.....	(358)
五 固化体及固化体废物的处置.....	(371)
(一) 隔离与处置.....	(361)
(二) 地下处置中的核素迁移与风险分析.....	(347)
(三) 地下处置安全评价的研究开发.....	(386)
(四) 海底处置.....	(424)
六 地下处置的国外现状和今后动向.....	(435)
(一) 美国和西欧诸国.....	(435)
(二) 国际吸附情报检索系统 (ISIRS) 研究计划.....	(445)
第三章 地下处置与日本的地层.....	(453)
一 总论.....	(453)
(一) 前言.....	(453)
(二) 地下处置选择何种岩石与岩体.....	(454)
(三) 地下处置与地质条件.....	(455)
(四) 日本的地质与地下处置.....	(463)
(五) 地质学与地下处置的研究开发.....	(468)
二 日本的地质与水理.....	(469)
(一) 与地下处置有关的基岩性质.....	(469)
(二) 基岩中的地下水.....	(474)
(三) 与地下水流有关的日本的基岩的特性.....	(480)
(四) 日本的基岩与地下处置的各种条件.....	(484)
第四章 各国的法规和标准化的动向.....	(490)
一 美国.....	(490)
(一) 关于在产生辐照核燃料以外的地方集中贮存〔所谓远离反应堆贮存 (AFR)〕.....	(491)
(二) 关于高放废物处置场.....	(491)
(三) 超铀废物.....	(492)
(四) 州等的干预.....	(492)

(五) 费用负担	(492)
二 法国	(493)
三 比利时	(494)
四 英国	(495)
五 德意志联邦共和国	(496)
六 瑞士	(497)
七 瑞典	(498)
八 国际机构	(499)
(一) 国际原子能机构 (IAEA)	(499)
(二) 经济合作发展组织的原子能机构 (OECD-NEA)	(500)
(三) 国际辐射防护委员会 (ICRP)	(501)
本书使用的主要术语说明	(502)
附录1 关于放射性废物对策	(505)
附录2 关于高放废物处理、处置研究开发的进展	(508)
附录3 关于低放废物的对策	(524)
附录4 节录原子能开发利用长期计划	(533)

绪 言

人类认识放射线是从伦琴在1895年1月发现X射线开始的。起初只是一些专门的科学家关心放射线，现在已成了全人类都关心的问题，是日常生活中非常熟悉而又不可缺少的东西了。

具有放射能的物质叫做放射性物质。人类对于放射性物质的使用在质与量上都是从第二次世界大战开始急剧地发展起来的。与此同时，放射性废物（系指作为废物的放射性物质和受其污染的物质）也随之急速地增加了。预计在今后数十年或更长一段时间内，依靠核裂变方式和平利用原子能将会大为增多。即使将来进入利用核聚变方式产生能的时代，也将产生与现在的放射性废物在性质上不同的废物。放射性废物的放射能，将被作为人类所有资源的一种形态来加以利用，即把现在认为是废物的物质以资源的方式进行开发。尽管如此，仍然不可避免地会有大量的放射性废物存在。因此，就需要采取措施把它处置到将来对人类的生存、繁荣没有影响。这种措施是和平利用原子能及其蒙受原子能恩惠的我们，应确定的任务。

核燃料的循环和放射性废物

从核燃料物质中取出其潜在能量的装置是原子反应堆。供给反应堆的核燃料是从天然铀的开采、冶炼开始，经过铀的浓缩，燃料加工成元件插入反应堆中。在堆中燃烧，即核裂变到某一个限度之后，从反应堆中取出核燃料，暂时贮存，冷却后再进行后处理，从中取出残存的铀和生成的钚等核裂变物质，把它再做为核燃料，重新放进原子反应堆中燃烧，这一系列过程叫做核燃料的循环。在核燃料循环的各个过程中分别排出不同种类和数量的放射性废物，其中大部分需要按各自的性质状态，进行适当的处理（图1）。

放射性废物的种类和分类

放射性废物是多种多样的。从状态分类，可分为气体、液体和固体的放射性废物；从其放射能的水平分类，可分为低水平、中水平和高水平的放射性废物；从其放射出的放

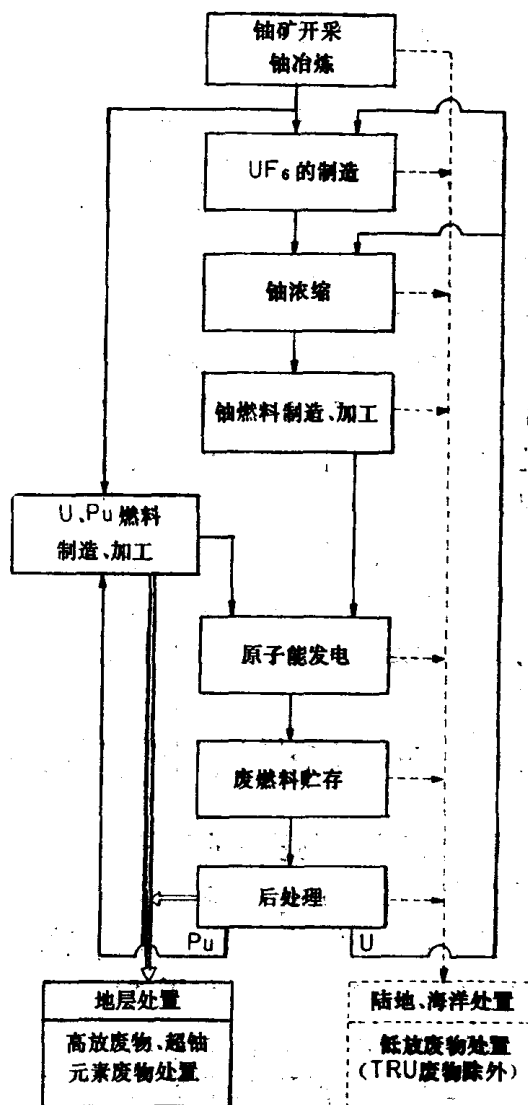


图1 核燃料循环工艺及其各工艺废物的流程概要

射线种类分类,可分为 α 及 β 、 γ 废物。

废液有无机、有机、酸性、中性、碱性等区别;固体废物从微粉末状物质到大块物质,包括各种不同组成和形态;也包括废机器、废装置及废设施等,也有实验用的动物尸体等。

另一方面,按其性质可分为可燃性、难燃性和不燃性;按其利用形态和排出源设施分成放射性同位素废物、反应堆废物、后处理废物。当然在这些废物中所含的核素是极不相同的。

对于这些种类繁多的废物,虽然常常按放射能水平分类,但划分界限并不十分明确。对于液体废物,一般标准是把从 $10^4 \sim 3 \mu\text{Ci/mL}$ 到 $10^{-1} \mu\text{Ci/mL}$ 范围内的废液作为中等水平;在此范围以上的为高水平,以下的为低水平。但在实际上对待性质和形状不同的各种放射性废物,这样划分界限数值即使明确规定,也并无多大的意义。这是因为,应该把这些废物的形态和含有的放射性核素及核素的性质状态与废物的放射能水平综合考虑。国际原子能机构和经济合作与发展组织核能机构(IAEA和OECD-NEA),就是把放射性废物放射能水平与含核素的种类、数量及特性、半衰期等综合考虑以研究处理方式。

表1为IAEA按放射性废物处理而划分的一般特征,表的注释说明,其特征是定性的,可因情况而变化。

放射性废物是由低水平和高水平的废物所构成。笼统地说,除后处理工艺中排出的高放射性废物以外都属于低放射性废物。虽然相当一部分废物是原子反应堆运转时排出来的,但在实际处理与处置核燃料循环的各过程中所排出来的放射性废物,仅这样简单的区分是不充分的。然而,按照这样的区分进行叙述,概念很容易掌握,所以本书打算按一般习惯分类。

虽然能量水平低,但是从铀的冶炼废渣和超铀(TRU)废物的处理与处置观点看,应该完全不同地对待,故在美国已从低放废物的范畴分出,本书则包含在广义的低放废物之中了。废燃料的包壳从分类上说,当然属于中放废物,本书为方便起见,把它纳入高放废物的范畴。

放射性废物的分类是简便定性的。因为处置是将废物中的放射性降到对包括人类在内的生物影响处于所允许限度以下。基本上不管放射性废物的水平,而采用共同的方式和方法进行处置。本章首先就是从这样的立场出发来叙述放射性废物的处理和处置的。

本书中“处理”、“贮存”和“处置”等词的意义

关于放射性废物管理的研究,还不到30年的历史,有的技术正在开发,目前使用的、用语也没有明确的定义。这不仅在日本,就是在欧美原子能技术先进的各国也是同样的。本书是许多作者共同执笔的,我们注意了明确本书中若干主要用语的意义。在本书的卷末对若干用语的意义作了解释。在这里对其中特别重要的,如“处理”、“贮存”

“处置”等术语,预先给予详细叙述。

“处置” 处置就是将放射性废物中所含的放射性核素处理到将来对人类的影响在容许限度以下的状态。其作法有两种:一是把废物排放到大气和海洋等环境中扩散稀释

表1 关于放射性废物处置的分类和特征*

分 类	特 征
高 水 平 长半衰期	高 β/γ 含相当数量的 α 高放射性毒性 发生热高
中 水 平 长半衰期	中水平的 β/γ 含相当数量的 α 有中等程度放射性毒性 发生热低
低 水 平 长半衰期	低水平的 β/γ 含相当数量的 α 有低/中放射性毒性 发生热很少
中 水 平 短半衰期	中水平的 β/γ 几乎不含有 α 有中等程度放射性毒性 发生热低
低 水 平 短半衰期	低水平的 β/γ 几乎不含有 α 有低水平放射性毒性 发生热很少

• 其特征是定性的，可因情况而变化。

以降到标准以下；另一种是把废物适当的封闭使之长期与生物圈隔离。

从反应堆及核燃料的各种设施中排出的放射性废气和废水，一部份要经过过滤、贮存、洗净、稀释或蒸发等处理后，排放到大气或海洋中去。这些废物不能再回收，因此，要在控制下排放，排放量控制在将来也不致使人类受到不良影响的范围内。

另一方面，对于排放到环境中担心产生不良影响的放射性废物，要用适当的方法减容、固化，变成稳定状态（其物理性质，化学性质都很稳定，核素很难移动的形态，称为Immobilization）。并使它处于能长时间（ $10^2 \sim 10^5$ 年的数量级）与生物圈隔离的状况，即使在这期间由于某种原因破坏了封闭，发生了破坏隔离状态的事故，其所含的核素排放到处置环境中，废物中的核素充分衰变再次出现在生物圈中时，它对生物的影响必须能够达到可以忽略的程度。

对以上所叙述的放射性废物，不管放射性水平高低，还是半衰期的长短，一般地把所谓处置的上述内容简练地表述如下。

适当处理放射性废物，排放到环境中，或是不想再取出与生物圈隔离，在处置场永久地收存。

所谓不想再取出，意味着一旦经处置场收藏，无论是什么原因都不打算再取出，但

并不意味着必要时花销经费也不可以回收。

处置以后一般不由人管理，应按照状况实行限制进入，或在一定期间内，根据情况测量放射线等管理是适当的有效的。特别是在刚刚处置之后最好暂时执行某些管理。然而，无论如何应认识到这类管理措施都不是为保护公众的健康和安全所直接需要的。

“处理” 处理就是为放射性废物运输，贮存或者处置，把放射性废物做适当状态的操作。如前所述气体废物的处理是指过滤、稀释、洗涤等；液体废物的处理是指过滤、稀释、蒸馏、凝集沉淀、蒸发浓缩—固化（水泥、沥青、塑料、玻璃等）等操作；固体废物的处理是指去污、焚烧、减容（压缩、切断、熔融等）等操作，把废物做成更稳定、更难移动的状态（水泥固化体、玻璃固化体）。也包括在容器里收藏密闭或捆包装箱。

“贮存” 贮存就是在处理前或者处理后为日后进一步处理或处置而把放射性废物贮存在贮罐中或收纳在设施里，原则上要在有人管理下保管到所限定的时间。由于情况不同，有的需经历相当长的时间（数百年左右），所以要与上述的处置区别开来。

处理或贮存说到底还是处置的前操作，不能忘记最终目标是处置。

处置的基本方法

放射性废物含有放射性核素。放射线从地球有史以来就天然地存在着，生物长年在其影响下进化、发展。即使到将来，也避免不了。而且放射性物质所含的各个核素都具有一定的半衰期，放射能是随时间成指数关系衰减的。从这点上看，即使是高放废物只要选用适当的方法处置，将来对生物圈的影响可以达到忽略的程度。就是现在达不到，也可以期望将来的技术开发能够实现。

放射性废物处置的基本原则如下：

- ①由工艺和操作的改进，尽量降低放射性废物的产生量。
- ②根据所产生的放射性废物的特点，应以处置为目的进行适当的处理。
- ③根据处理后的放射性废物含有的核素的特性、含量及废物的状态等情况，或是向环境中排放，或是在处置场（repository）封闭隔离。

除排到环境中的处置方式之外，还有陆地处置、海洋处置（也称海洋投弃）或地层内处置。

陆地处置（表2）包括浅层处置（shallow ground burrial 或 shallow land burrial），主要是以含低水平、半衰期短的核素的废物做为对象。目前，美国、法国等国家采用此法。陆地处置的设施，除地下浅层地方的窖、坑或沟结构外，还可以按照情况把废物的固化物贮藏在废坑和地下空洞中，并用土壤覆盖掩埋堵塞而封闭隔离。

海洋处置，就是根据伦敦投弃条约规定，在深海底（4000m以上的深海）处置。适于海洋投弃的低水平放射性废物的固化体，鉴于海洋的国际性，在国际海洋监督组织的同意下才能实施。由于海洋具有非常大的稀释能力和深海的隔离能力，所以是有利的方法。现在大西洋海域的英国、荷兰、比利时、瑞士等国家实际都正在实行这种投弃方式。

对高水平放射性废物的处置，因为对其隔离性能和防止核素转移有更严格的要求，所以要求用比低水平放射性废物处置更严密，更高封闭性能的固化体包装箱，存放在适于处置的地层岩体深处（500~2000m）所设的处置场中（表2）。这种处置方法又叫地层处置（地下处置）法（geologic disposal）或深层处置法（deep disposal）。此情况下，由于核裂变生成物产生的裂变热对周围岩体的影响也是很重要的。另外，热发生率小的含有长寿命核素的超铀元素 α 废物，从其危险性来看，与高水平放射性废物同样处置较为妥当。

表2 放射性废物的区别和陆地处置方法的试用方案

处置方式		废 物 分 类				
		高水平 长半衰期	中水平 长半衰期	低水平 长半衰期	中水平 短半衰期	低水平 短半衰期
地 层 处 置	a) 干燥	固化、稳定化包装箱 为便于散热留有空隙	固化、稳定化、包装箱		有可能同意，但恐怕没有这么处置的必要。*)	
	b) 湿润	同上，为防止水的浸入，在工程上增加阻挡层（绝缘套）	同上，为了防止水的浸入，在工程上加了阻挡层（包装箱外加绝缘套）			
废矿井或 a) 地下空洞处置	a) 干燥	不 适 用	根据环境有可能适用		固化，必须包装。*)	
	b) 湿润	不 适 用			固化，稳定化，包装箱。*)	
地 下 （ 浅 层 ） 处 置	a) 干燥	不 适 用			固化、稳定化、包装箱	固化、稳定化、包装箱
	b) 湿润	不 适 用			需要充分的工程绝缘、稳定化、包装箱	需要充分的工程绝缘、固化、稳定化、包装箱

注：a) 隔绝地下水流的地层

b) 伴有若干地下水流的地层

c) 处理放射性废物用的专门挖掘的处置场

d) 天然的，或者废矿井，或者为了处置废物所挖掘的矿井及洞穴。

e) 不适合浅地层处置的国家，可以考虑采用。

此外，在深海底的堆积物或在地层中对能否埋放固化体包装箱的处置研究，已成为国际性的未来问题进行探讨。

在不允许向环境中排放的情况下，虽然都在海洋乃至地质环境中封闭与生物圈隔离，但对低水平和高水平（及TRU）废物来说，其隔离时间和严密程度，材料的耐久

性,防止核素转移性能及其他特性都有所不同。都要:1) 废物固化体或用包装箱;2) 为处置所设置的设施;3) 在地下处置时,根据地下处置设施周围的地质环境设置多重防护。处置系统的总体功能与安全目标一致。

如果核素漏出并转移到生物圈中,受影响最大的可能是地下水。因此,在地层处置的情况下,对地下深处的水文地质研究是非常重要的。

另外,日本是个地震国、火山国,地下水又丰富,所以很多人感到在日本找到适合地下处置的地层是很困难的。但是,日本对地层几乎没有调查,特别是对资源地带以外的地下1000m左右的深地层,还有很多问题没搞清楚。日本有无适于处置的地层有待今后调查研究。的确,日本没有象美国、加拿大、苏联那样广大的国土,但却有着高密度的人口,这自然对地层处置是不利的。然而不做调查研究就作决定是不能令人满意的。为了把日本的地质条件与有关技术相结合而建立可能的处置体系,尽早着手调查是非常重要的。

铀的冶炼废渣和极低水平的放射性废物

1. 铀矿山尾矿及冶炼废渣的处理与处置

日本的铀资源量很少,把“人形峠”及“东浓”两个矿山与其他的矿山合在一起,大约有7000~8000t铀,所以问题不大。但从全世界看,成为问题的是铀冶炼产生的含铀尾矿(mill tailing)废物处置。在美国和加拿大叫做mine tailing的尾矿排出量。巷道开采产生的尾矿量与矿石量相等,至多为矿石量的2倍左右。现在美国、加拿大的尾矿量都已积蓄到一亿吨以上,到2000年都能累积到数亿吨。在大多数情况下把尾矿回填到矿坑内埋藏处理,从这些回填的尾矿中放出的Rn量达到地面上矿石放出Rn量的10%以下。

铀矿石用硫酸或强碱溶液处理,大约可回收90%的铀。废渣中残留的放射能量为原矿石中所含放射能量的60~85% (大约残留10%的U, 90%的Th, 99%的Ra, Pb, Po等)。美国的冶炼废渣中 ^{226}Ra 的平均浓度约为450pCi/g,据此可知废渣表面Rn的通量约为300pCi/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。虽然这样的冶炼废渣的比放射性是微弱的,但却含有大量的长寿命 α 核素,并放出放射性Rn气体,所以必须慎重对待。美国在1978年制定了铀冶炼废渣射线管理法。加拿大把铀冶炼废渣泥浆贮存在沉淀池中或者回填(有时侯加水泥),美国也采用了同样的方法。最近埋藏在地下孔内或者堆在表面,在上面至少覆盖3m以上厚的土,进行植被,以便减少废渣的飞散及Rn的逸出。目前正在研究用沥青覆盖废渣表面的方法。今后随着这种废渣量的增加,必须更加深入地研究处理与处置技术。

2. 极低水平的放射性废物

前述低水平标准大约在 $10^{-1}\mu\text{Ci/mL}$ 以下。现在日本没有规定与核燃料有关的放射性固体废物放射性水平的下限值。但凡在管理区域内产生的,即使是极低水平,都应作为放射性废物对待。然而,这显然是不合理的,因在我们周围也存在着很多天然的放射

性物质。例如，在花岗岩中就含有 $1\sim 5\text{pCi/g}$ 左右的铀、钍等天然放射性元素。但人们并不认为花岗岩是放射性物质，所以一点也不限制花岗岩的使用。

在“射源危害防止法”中，放射性同位素的定义是放射性在 2nCi/g 以上，固体状自然存在的放射性同位素及其化合物在 10nCi/g 以上。即使是人工产生的放射性废物，也应在考虑了其形态和核素之后，达到对人类产生的影响可以忽略不计的程度，将其与一般的废物同样管理是合理的、必须的。据说瑞士等国家制定了一定的条件，把符合条件的放射性废物就看做非放射性废物处置。英国、联邦德国也制定了限制放射性废物的水平，美国正在研究。根据其核素和形态制定限制水平和确定处置方式等，今后都需要慎重地研究决定。

如何实现放射性废物处置

对于放射性废物，特别是对高水平放射性废物的处置是个比较新的问题。因往往加入了人的主观因素，所以仅仅解决技术问题是不够的，还需要自然科学、人文学及社会科学等方面广泛理解和协作。从最近发表的原子开发利用长期计划（1982年6月）看，确定高水平放射性废物的处置技术，其时间在2000年以后，但现在还没有确立安全评价的方法。这个问题要在数十年内确定，而且使其后的处置成为现实，必须在周密计划下，并要得到有关部门密切配合和分担任务。

另外，解决废物处置的重要问题是民众的同意。最近在有关废物的学会会议上，就有以民众接受为主题的论文或发言。

这个问题，不用说是海洋处置，即使是陆地处置也是全世界共同的问题。现在需要进行广泛的国际协作，今后在取得成果时，用人类的智慧努力争取早期解决核燃料循环上的重大问题。